

А.Я. Рыбалко, канд. техн. наук, В.И. Панченко
(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

ПРОВОД ДЛЯ СЕТЕЙ ТОКА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

В системе электроснабжения бесконтактных электровозов тяговую сеть выполняют из проводников специальной конструкции. Используют многопроволочный провод, что диктуется специфическими особенностями в применении тока повышенной частоты и достижении необходимой гибкости проводов при монтаже сети. Поскольку сеть является материалоемким элементом системы электроснабжения, то ставятся задачи снизить расход проводникового материала [1, 8]. Однако при этом следует обратить внимание на тот факт [2, 7], что в тяговой сети наибольшие потери энергии в системе электроснабжения, т.е. имеют действие противоречивые факторы применительно к задаче выбора сечения и размеров провода для тяговой сети.

Для диапазона реальных к использованию в действующих электроустановках значений частот 4 ... 10 кГц поставленный вопрос до настоящего времени недостаточно исследован [2, 3]. Уровень потерь энергии обуславливает, при условии неизменного значения тока в сети [2], в основной мере электрическое сопротивление проводов. В работе [9] использована оценка удельного электрического сопротивления в виде

$$Z_{y0} = \frac{2j^{3/2}\sqrt{\omega\mu_0\mu_r}}{\pi d\gamma} \cdot \frac{J_0\left(j^{3/2}\frac{d}{2}\sqrt{\omega\mu_0\mu_r}\right)}{J_1\left(j^{3/2}\frac{d}{2}\sqrt{\omega\mu_0\mu_r}\right)} + j\frac{\omega\mu_0}{\pi} \ln\frac{2b}{d}. \quad (1)$$

Здесь d - диаметр провода; b - расстояние между проводами сети;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ_r - относительная магнитная постоянная проводникового материала; γ - удельная проводимость материала проводника; ω - круговая частота колебаний электромагнитного поля, создаваемого током в проводе;

$J_0\left(j^{3/2}\frac{d}{2}\sqrt{\omega\mu_0\mu_r}\right)$, $J_1\left(j^{3/2}\frac{d}{2}\sqrt{\omega\mu_0\mu_r}\right)$ - функции

Бесселя первого рода нулевого и первого порядков аргумента $\left(j^{3/2}\frac{d}{2}\sqrt{\omega\mu_0\mu_r}\right)$.

Если перейти к функциям Кельвина в экспоненциальной форме записи и ввести обозначение

$$k = \sqrt{\omega\mu_0\mu_r}, \quad (2)$$

то уравнение (1) можно записать как

$$Z_{y\delta} = \frac{2k}{\pi d \gamma} \cdot \frac{M_0\left(k \frac{d}{2}\right)}{M_1\left(k \frac{d}{2}\right)} \exp\left[\theta_1\left(k \frac{d}{2}\right) - \theta_0\left(k \frac{d}{2}\right) - \frac{\pi}{4}\right] + j \frac{\omega \mu_0}{\pi} \ln \frac{2b}{d}. \quad (3)$$

Здесь $M_1\left(k \frac{d}{2}\right)$, $M_0\left(k \frac{d}{2}\right)$ - модуль и $\theta_1\left(k \frac{d}{2}\right)$, $\theta_0\left(k \frac{d}{2}\right)$ - фаза функции Кельвина, соответственно, при значениях d и $d=0$ в аргументе $\left(k \frac{d}{2}\right)$ функции.

Далее на основе выражения (3) рассматриваем активную составляющую электрического сопротивления проводов, поскольку в тяговой сети выполняют компенсацию индуктивного сопротивления по мере достижения состояния резонанса напряжений. Повышение активного сопротивления оцениваем по отношению к омическому, поэтому выражение (3) преобразуем к виду

$$\frac{R_{y\delta,n}}{R_{y\delta,=}} = k \frac{d}{2} \frac{M_0\left(k \frac{d}{2}\right)}{M_1\left(k \frac{d}{2}\right)} \cos\left[\theta_1\left(k \frac{d}{2}\right) - \theta_0\left(k \frac{d}{2}\right) - \frac{\pi}{4}\right], \quad (4)$$

где $R_{y\delta,=} = 4/(\pi d^2 \gamma)$ - удельное сопротивление цельного провода постоянному току; $\Delta = \sqrt{2}/k$ - глубина проникновения электромагнитной волны в проводник, для диапазона частоты 4 ... 10 кГц она составляет 1,05 ... 0,66 мм. Это соответствует для проводов реальных сечений до 120 мм² и диапазону 0,3 ... 6,8 аргумента функции Кельвина.

Если качественно оценивать зависимость (4), то чем больше частота тока и проводимость материала провода, тем сильнее проявляется поверхностный эффект и, следовательно, снижается доля использования сечения провода, повышается его активное сопротивление и, соответственно, потери энергии. Очевидно, что сечение, конструкцию провода следует также выбирать исходя из критерия – потерь энергии. Оценим количественно первопричины появления добавочных потерь энергии, которые вызваны протеканием тока повышенной частоты, в различных конструкциях многопроволочного провода для тяговой сети. На этой основе проанализируем взаимосвязь конструкции, геометрических размеров и электрических характеристик провода (омическое и активное сопротивление).

Рассмотрим простейшую конструкцию многопроволочного провода, в которой сплошное проводящее сечение состоит из цельных проволочек диаметром $d_{np} = 2r_{np}$.

- При протекании переменного тока по цельному цилиндрическому проводу ($d \equiv d_{np}$) в нем наблюдается вытеснение тока к внешней поверхности

(поверхностный эффект), и, следовательно, активное электрическое сопротивление увеличивается, т.е.

$$R_{y\vartheta,n} = R_{y\vartheta,=} \cdot f_n(d_{np}, \omega). \quad (5)$$

Исследуем функцию $f_n(d_{np}, \omega)$ в рассматриваемом диапазоне частот, используя зависимость (4) и табличные значения функции Кельвина [9, 10]. Ее график в зависимости от диаметра провода и частоты приведен на рис.1, из которого видно, что с повышением частоты и диаметра провода возрастает его активное электрическое сопротивление. Это возрастание имеет различную скорость, что можно наблюдать по параметру $(d/(2\Delta))$ на рис.2. Используя свойства графической зависимости на рис.2, аппроксимируем (4) более простым выражением:

$$\frac{R_{y\vartheta,n}}{R_{y\vartheta,=}} = \begin{cases} 1 + 0,01958 \frac{d}{2\Delta} & \text{при } \frac{d}{2\Delta} \leq 1,597; \\ 0,3 + 0,458 \frac{d}{2\Delta} & \text{при } \frac{d}{2\Delta} \geq 1,597. \end{cases} \quad (6)$$

Как видно из системы уравнений (6), создавать многопроволочный провод следует при условии заполнения необходимого сечения из изолированных проволочек диаметром $d \leq 3,194\Delta$. Тогда его активное сопротивление за счет эффекта вытеснения тока увеличится только на 1,96 %.

Если перейти к проводу, то сплошное проводящее сечение образуют N изолированных цельных проволочек. Увеличение его активного сопротивления (6) за счет поверхностного эффекта такое же, как для одной проволочки, т.е.

$$R_{0,n} = \frac{1}{\pi r_{np}^2 \gamma N} f_n\left(\frac{d_{np}}{2\Delta}\right). \quad (7)$$

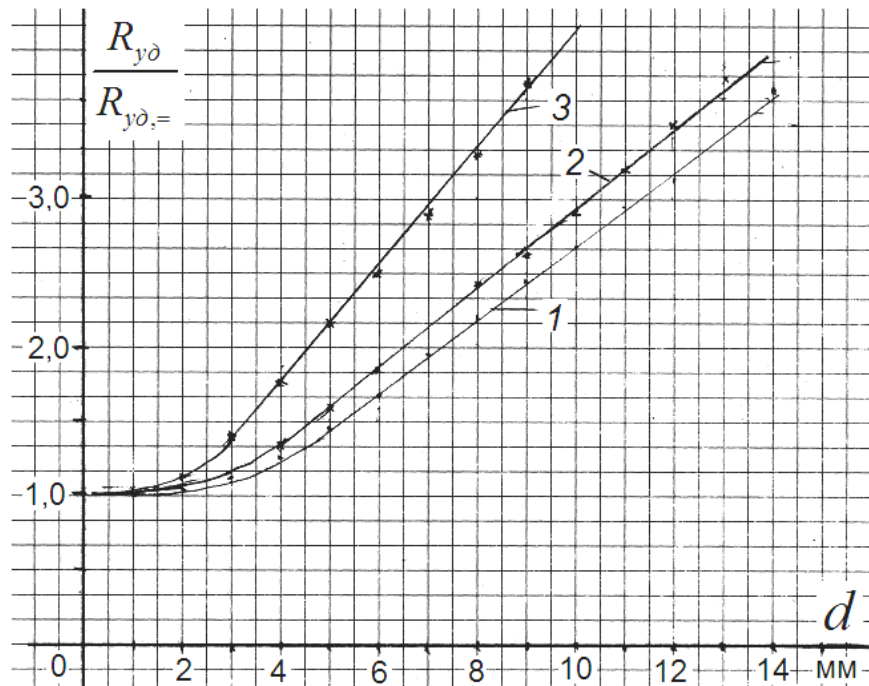


Рис.1. Зависимость прироста в результате поверхностного эффекта активного сопротивления проволочки провода от диаметра и частоты: 1- 4 кГц; 2 – 5 кГц; 3 – 10 кГц

• Каждая цельная изолированная проволочка провода находится под воздействием магнитного поля токов, которые протекают во всех остальных проволочках. Поэтому в цельных проволочках возникают вихревые токи (эффект близости) и имеют место дополнительные потери энергии в цельной проволочке, которые согласно работе [1] определяют в единицу времени соотношением

$$P_{np} = \frac{2\pi}{\gamma} H_m^2 \cdot f_{\partial l} \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right). \quad (8)$$

Здесь H_m - амплитуда напряженности магнитного поля в месте расположения

элементарного проводника, $H_m = \frac{I_m}{2\pi r_0^2} r$; I_m - амплитуда тока в проводе; r_0 - на

ружный радиус провода; функцию $f_{\partial l} \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right)$ можно представить первыми членами разложения в ряд функций Бесселя[4]:

$$f_{\partial l} \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right) = \frac{1}{4} \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right)^4 \quad \text{при } d_{np} < 2\Delta; \quad (9)$$

$$f_{\partial l} \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right) = \frac{d_{np}}{2\Delta} - \frac{1}{2} \quad \text{при } d_{np} > 2\Delta. \quad (10)$$

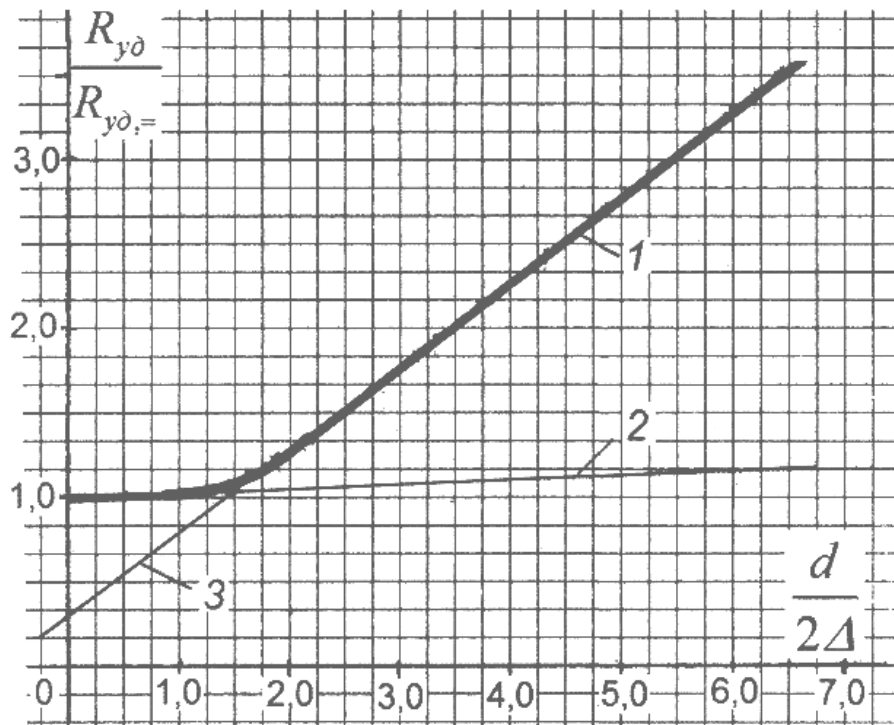


Рис.2. Зависимость прироста в результате поверхностного эффекта активного сопротивления проволоочки провода от диаметра и глубины проникновения электромагнитной волны в проводник (кривая 1) и ее аппроксимации по участкам: кривая 2 – при $d < 2\Delta$; прямая 3 – при $d > 2\Delta$

Для всего сечения провода справедливо $\pi r_0^2 = \frac{\pi r_{np}^2 N}{p}$, где p – коэффициент заполнения сечения проволочками, а $\frac{N}{\pi r_0^2} = \frac{p}{\pi r_{np}^2}$ – количество проводников приходящихся на единицу поперечного сечения провода. Тогда в элементарном кольце провода сечением $2\pi r dr$ площадь проволочек определяем из выражения

$$ds_{\kappa} = \frac{2p r dr}{r_{np}^2}. \quad (11)$$

Если отнести потери мощности (8) на единицу площади, то запишем для элементарного кольца радиусом r провода с учетом равенства (11)

$$dP_{\delta l} = \frac{P_{np}}{\pi r_{np}^2} ds_{\kappa} = \frac{4\pi p r}{\gamma r_{np}^2} H_m^2 \cdot f_{\delta l} \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right) dr. \quad (12)$$

Выполнив интегрирование (12) в пределах $[0; r_0]$, получим потери мощности в сечении всех проволочек провода, т.е.

$$P_{\delta l} = \frac{I_m^2 p}{\pi \gamma d_{np}^2} \cdot f_{\delta l} \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right). \quad (13)$$

В этом равенстве выделяем выражение для эквивалентного активного электрического сопротивления многопроволочного провода:

$$R_{\bar{\sigma}l} = \frac{P}{2\pi\gamma d_{np}^2} \cdot f_{\bar{\sigma}l} \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right). \quad (14)$$

Тогда с учетом оценок проявления эффектов поверхностного (7) и близости (14) результирующее активное сопротивление

$$R_{y\sigma} = R_{0n} + R_{\bar{\sigma}l} = R_{0y\sigma} \cdot \left[f_n \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right) + \frac{p^2}{2} \cdot \left(\frac{2r_0}{d_{np}} \right) \cdot f_{\bar{\sigma}l} \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right) \right],$$

где $R_{0y\sigma} = 1/(\pi r_0^2 \gamma p)$ - удельное сопротивление многопроволочного провода постоянному току.

Рассмотрим конструкцию многопроволочного провода, когда проводящий слой образует *трубчатый проводник*. Такая конструкция провода позволяет снизить расход проводникового материала [1].

Напряженность магнитного поля внутри такого провода в точке сечения проводящего слоя на радиусе r согласно работе [5] можно записать как

$$H_m = \frac{I_m (r^2 - r_1^2)}{2\pi (r_2^2 - r_1^2) r}, \quad (15)$$

где r_2 , r_1 - наружный и внутренний радиусы проводящего слоя провода, соответственно.

Количество проволочек, приходящихся на единицу площади сечения проводящего слоя, определяется соотношением

$$\frac{N}{\pi (r_1^2 - r_2^2)} = \frac{p}{\pi r_{np}^2},$$

тогда их площадь в элементарном кольце сечением $2\pi r dr$ внутри проводящего слоя будет следующей:

$$2\pi r dr \cdot \frac{p}{\pi r_{np}^2} = \frac{2p}{r_{np}^2} r dr.$$

Составляющую активного сопротивления трубчатого проводящего слоя от эффекта близости получаем аналогично (14), но с учетом (15) и при интегрировании в пределах $[r_1; r_2]$:

$$R_{\bar{\sigma}l} = \frac{2p}{\pi\gamma d_{np}^2} \cdot f_{\bar{\sigma}l} \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right) \cdot F \left(\frac{r_1}{r_2} \right). \quad (16)$$

Здесь функция

$$F\left(\frac{r_1}{r_2}\right) = \frac{1 - 4\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \left(3 - 4 \ln \frac{r_1}{r_2}\right)\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^4}{\left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2}\right)^2}.$$

Тогда результирующее активное сопротивление провода с трубчатым проводящим слоем на основе оценок проявления эффектов поверхностного (7) и близости (16) можно записать как

$$R = R_{0,y\partial,=} \left[f_n \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right) + \frac{pN}{2} \cdot f_{\text{бл}} \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right) \cdot F \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \right],$$

где $R_{0,y\partial,=} = 1 / [\gamma \pi (r_2^2 - r_1^2) p]$.

Проведем численный анализ полученных электрических характеристик провода для рассмотренных его конструкций. Используем параметры системы электроснабжения бесконтактных электровозов В14: тяговая сеть выполнена многопроволочным медным проводом (удельная проводимость

$\gamma = 54,3 \frac{1}{\text{мкОм} \cdot \text{м}}$) с поперечным сечением 95 мм^2 , который состоит из 360 проволочек радиусом $0,29 \text{ мм}$, коэффициент заполнения сечения $p = 0,92$; частота тока в сети 5 кГц [2]. Глубина проникновения электромагнитной волны в проводящую среду $\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu_r}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 5000 \cdot 54,3 \cdot 4\pi \cdot 10^7 \cdot 1}} = 0,94 \text{ мм}$.

Если проволочки без изоляционного покрытия, то будет проявляться только поверхностный эффект и активное сопротивление провода составит $3,16R_{0,y\partial,=}$. Если проволочки изолированы друг от друга, то проявляется поверхностный эффект и эффект близости и активное сопротивление будет равно при сплошном сечении $1,36R_{0,y\partial,=}$, а при трубчатом проводящем слое - $1,06R_{0,y\partial,=}$.

Таким образом, провод в сети тока повышенной частоты для снижения влияния поверхностного эффекта и эффекта близости следует выполнять многопроволочным. Через совокупность проволочек достигается принудительное распределение тока по сечению провода. Проволочки в сечении должны быть изолированными и располагаться в трубчатом проводящем слое.

Список литературы

1. Рибалко А.Я. Оцінка витрати провідникового матеріалу в системі електропостачання безконтактних електровозів // Гірн. електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2001. – Вип.67. – С.53-60.

2. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт /Г.Г.Пивняк, И.П.Ремизов, С.А.Саратикянц и др.: Под ред. Г.Г.Пивняка. – М.: Недра, 1990. – 245 с.
3. Львов А.П. Электрические сети повышенной частоты. – М.: Энергоиздат, 1981. –104 с.
4. Ламмеранер И., Штофль М. Вихревые токи. Пер. с чешского. - М.-Л.: Энергия, 1967.- 208 с.
5. Куполян С.Д. Теоретические основы электротехники. Ч.3. Электромагнитное поле.- М.: Энергия, 1970. – 248 с.
6. Рихтер Р. Обмотки якорей машин постоянного и переменного тока. - Л.-М.: ГЭИ, 1933. – 264 с.
7. Розенфельд В.Е., Староскольский Н.А. Высокочастотный электрический транспорт. - М.: Транспорт, 1978.- 208 с.
8. Рыбалко А.Я. Снижение расхода проводникового материала в системе электроснабжения бесконтактных электровозов// Горн. информ.-аналит. бюл. – М.: МГГУ, 2003. - №3. - С.207-210.
9. Математичне моделювання електромагнітних процесів передачі енергії: Навч. посібник/ Г.Г. Півняк, М.Г. Поляков, А.Я. Рыбалко, С.О. Сушко: За ред. Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: НГУ, 2003. – 145 с.
10. Ватсон Г.Н. Теория бесселевых функций.– М.: Изд-во иностр. лит., 1949. – Ч.1. - 798 с.